

A csillag- és bolygókeletkezés korai fázisai – infravörös-csillagászat

Ábrahám Péter

MTA KTM Csillagászati Kutatóintézete

Történeti áttekintés

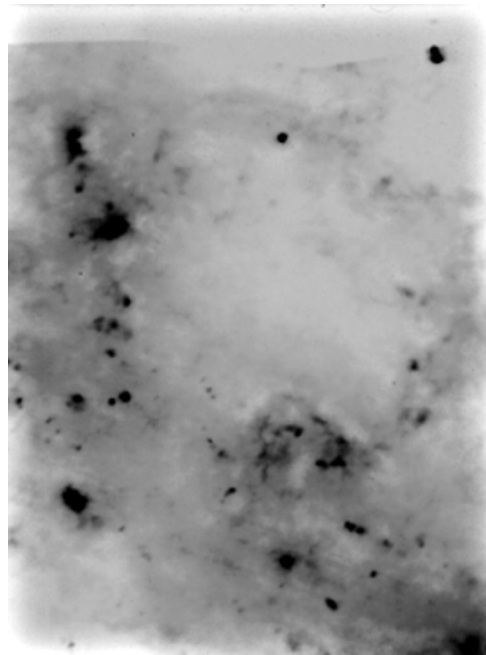
A fiatal csillagok – és keletkezésük színterei, a sűrű csillagközi felhők – vizsgálata a magyarországi csillagászat egyik hagyományos területe, mely az 1970-es évektől kezdve főleg a pizskéstetői Schmidt-távcső nagy látómezejének és objektívprizmás spektroszkópiai lehetőségeinek kihasználásán alapult. Ekkoriban a fő kutatási irányok közé tartozott a csillagközi felhők szerkezetének feltérképezése extinkciós mérésekkel; a felhők távolságának meghatározása Wolf-diagram segítségével; nyílthalmazok katalogizálása; fiatal nyílthalmazbeli kis tömegű csillagok flártevékenységének analízise; valamint erős H α -emissziót mutató T Tauri csillagok azonosítása különböző csillagkeletkezési területeken. A csillagközi anyag és a protocsillagok alacsony hőmérséklete miatt azonban az ilyen típusú vizsgálatokra nem az optikai a legmegfelelőbb hullámhossztartomány. Ezért az 1980-es évek második felében nyitás történt az infravörös tartomány felé, és az MTA KTM Csillagászati Kutatóintézetében elkezdődött az IRAS mesterséges hold infravörös- adatainak feldolgozása, valamint fiatal magyar kutatók részvétele európai szintű infravörös-csillagászati projektekben. Az első hazai infravörös-csillagászati eredmény a Cepheus csillagképben található, mintegy 10 fok átmérőjű, óriási porgyűrű (*1. ábra*) felfedezése volt az IRAS hold mérései alapján (Kun Mária, Balázs Lajos, Tóth Imre, 1987).

1993-tól hosszabb-rövidebb időszakokban több magyar kutató (Ábrahám Péter, Kiss Csaba, Tóth L. Viktor) dolgozott a heidelbergi Max-Planck-Institut für Astronomie-ban, ahol az Európai Űrügynökség *Infrared Space Observatory (ISO)* nevű infravörös-űrtávcsövén működő fotométer, az *ISOPHOT* kalibrálási, adatfeldolgozási és tudományos kérdéseivel foglalkoztak. Hazatérésük után, 2001-ben alakult meg az ESA és a Magyar Űrkutatási Iroda támogatásával a Konkoly Infravörös és Űrcsillagászati Csoport, amely az ISO/ISOPHOT kalibrációjának javítását, valamint a műhold különösen nagy pontosságot igénylő, különleges kihívást jelentő méréseinek kiértékelését és publikálását tűzte ki céljául. A műszerkalibrációban különösen fontos eredményeket sikerült elérni a hosszú hullámhosszú detektorok tranziens viselkedésének leírása, a pontforrások képének (az ún. *point spread function*) jellemzése és az ISOPHOT-S spektrométer fotometriai pontosítása területén. Az ESA-val kötött szerződés keretében a Csillagászati Kutatóintézetben egyedileg, interaktívan kiértékelte ISOPHOT mérések visszakerültek az ISO hivatalos archívumába, ahonnan ma is letölthetők tudományos analízis céljára.

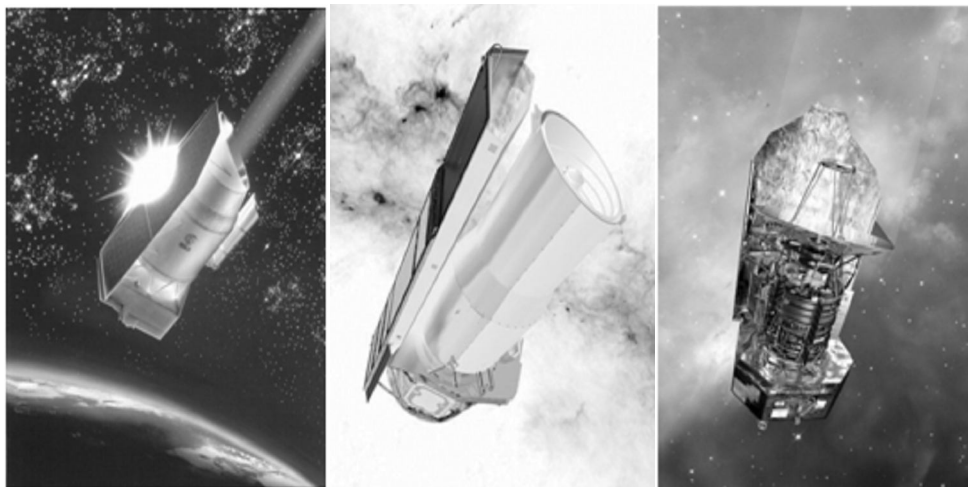
2005-től kezdve a Konkoly Infravörös és Űrcsillagászati Csoport folyamatosan részt vesz az ESA eddigi egyik legnagyobb vállalkozása, a Herschel Space Observatory előkészítő munkálataiban. A Herschel infravörös-űrteleszkóp 3,5 m átmérőjű tükre az űrbe valaha küldött legnagyobb távcsőtükör. A távcső a távoli-infravörös és a szubmilliméteres hullámhosszakon az eddigiekkel össze nem hasonlítható, különlegesen jó szögfelbontású, érzékeny képeket és színképeket vesz fel az Univerzum hideg anyagáról. A Konkoly csoport kezdetben a Herschel/PACS műszer földi kalibrációs méréseinek kiértékelésében vett részt, az űrtávcső 2009. májusi felbocsátása óta pedig ugyanezen műszer napi üzemeltetésében, a PACS jeleinek monitorozásában a kalibráció és az adatfeldolgozás finomításához járul hozzá, továbbra is az ESA és a Magyar Űrkutatási Iroda támogatásával.

A Herschel előkészítő fázisával párhuzamosan, 2004-től évente lehetőség nyílt tudományos pályázatok benyújtására a NASA infravörös-űrtávcsövére, a Spitzer Space Telescope-ra. A magyar kutatók, korábbi infravörös-csillagászati tapasztalataiknak köszönhetően, kiemelkedően sikeresen szerepeltek: nyolc elfogadott távcsőidő-igénylésük, közöttük kettő az ún. Rendkívüli Igazgatói

Időkeret terhére, nagyon szép eredménynek számít. A magyar infravörös-csillagászat történetében eddig kiemelkedő szerepet játszó három űrteleszkópot mutatja be a 2. ábra.



1. ábra. Az IRAS mesterséges hold mérései alapján a Cepheus csillagképben felfedezett óriás porgyűrű, a magyarországi infravörös-csillagászat első jelentős eredménye (Kun et al. 1987).



2. ábra. A magyarországi infravörös-csillagászat három fontos űreszköze. Balra: Infrared Space Observatory; középen: Spitzer Space Telescope; jobbra: Herschel Space Observatory.

Az infravörös sugárzás és csillagászati jelentősége

A kozmoszról szerzett tudásunk, információink legfőbb forrása az elektromágneses sugárzás. Hogy ez nem csak a szemünkkel érzékelhető látható fényt jelentheti, arra *William Herschel* mutatott rá 1800-ban. A Nap fényét prizmával színeire bontva Herschel észrevette, hogy az ismert szivárványszínek mellett a vörösön túl – ahol az emberi szem már nem lát fényt – az odahelyezett hőmérők melegedést, elnyelt sugárzást jeleztek. Az *infravörös* („vörös alatti”, magyarul gyakran egyszerűen hő-) sugárzás csak hullámhosszában különbözik a látható fénytől. Míg az utóbbi a 0,3–0,8 mikrométeres színeképtartományt fedi le (a kisebb érték az ibolya, a nagyobb a vörösnek felel meg),

addig az infravörös az 1–300 mikrométer közötti spektrális sávot jelenti. Ezen belül megkülönböztetünk közeli- (1–3 μm), közép- (3–40 μm) és távoli-infravörös (40–300 μm) tartományokat. A nagy különbség azonban az optikai csillagászathoz képest az, hogy a földi légkör áteresztése nagyon korlátozott, ezért célszerű a műszereket a légkörön kívülre vinni. A 20 μm -nél rövidebb hullámhosszakon a légkör még bizonyos sávokban átengedi a sugárzást, azonban már e sávokban is csak a Föld legszárazabb pontjairól lehet mérni, mivel a fő elnyelő a vízgőz. A földi infravörös-távcsövek tehát magas hegyeken (pl. Hawaii), sivatagban (Atacama, Chile), illetve a tervek szerint később az Antarktiszon épülnek.

Mi is a kozmikus infravörös sugárzás forrása? Tudjuk, hogy a csillagok sugároznak ebben a színképtartományban, hiszen a több ezer–tízezer fokal hőmérsékletüknek megfelelő feketetest-sugárzásnak jelentős járuléka van az optikainál hosszabb hullámhosszakon is. A hidegebb csillagok viszonylagosan még ennél is több hősugárzást bocsátanak ki, sőt a Napnál kisebb tömegű vörös törpecsillagok emissziója már nagyrészt a közeli-infravörösbe esik. A közelmúltban felfedezett *barna törpék* (a csillag és a bolygó közötti átmeneti objektumok) is már inkább csak itt figyelhetők meg, alacsonyabb hőmérsékletük (<2000 K) okán. A még hidegebb exobolygók termikus sugárzásának csúcsa a közép-infravörös tartományba esik, míg a bolygórendszer külső területein található üstökösmagok és csillagközi porokorongok, valamint a csillagközi porfelhők, amelyek összesűrűsödése által a csillagok kialakultak, már a távoli-infravörösben sugároznak. (Ezen objektumok egy része a látható fényben is vizsgálható, ám csak közvetett hatások révén: kitakarják a háttércsillagokat, vagy szórják a rájuk eső csillagfényt). Még nagyobb, kozmológiai távolságokra tekintve az ún. *vöröseltolódás* jelensége miatt a távoli és így az Univerzum ifjúkoráról hírt adó galaxisok és csillagok fénye szintén infravörös hullámhosszakon figyelhető meg. Fontos csillagászati tény az is, hogy infravörös hullámhosszakon a kozmosz sokkal átlátszóbb is, mint az optikai tartományban. A csillagközi porfelhők részecskéi ugyanis elnyelik és szórják a csillagfényt, ezáltal a távolabbi égitestek fénye gyengül és vörösödik, mire megérkezik hozzánk. Ez a hatás azonban lényegesen lecsökken az infravörös hullámhosszakon, mivel a mikrométeresnél kisebb porszemcsék elnyelési és szórási tulajdonságai erősen függenek a frekvenciától. Keresztül láthatunk tehát szinte az egész Tejútrendszeren, közvetlenül megfigyelhetjük a Galaxis egyébként láthatatlan magját, és beleláthatunk a legfiatalabb csillagokat körülvevő sűrű porburkokba is.

A legtöbb, infravörösben fényes égi objektum esetében, bár van némi hozzájárulás a gázatomokból és molekulákból is, főként a porszemcsék termikus sugárzása látható. Ezek a szilikát vagy grafit alapú porszemcsék megtalálhatók mind a csillagközi, mind a csillagközi térben, a gáztömeg kb. 1%-ának megfelelő mennyiségben, legalábbis ott, ahol a hőmérséklet 1600 K, a szilikátok párolgási hőmérséklete alatt van. Hidegebb helyeken a szemcsékre jégréteg is rakódhat. Mivel a csillagközi por inkább kisebb szemcsékből áll, a nagyobb porrészecskék jelenléte a csillagok körül a por összetapadásának a jele, amely az első lépés a bolygókeletkezés felé. A csillagközi korongokban gyakran látunk kristályos szerkezetű szilikátokat is (szemben a tipikus amorf szemcsékkel). Ezek a rendezettebb kristályszerkezetnek köszönhetően élesebb rezonanciákat, keskenyebb emissziós alakzatokat mutatnak az infravörös színképben. Ugyanezeket a kristályos jellegzetességeket mutatják a naprendszerbeli üstökösök is (l. alább).

A csillagok születése

Mai elképzeléseink szerint a csillagok molekulafelhőkben, a csillagközi anyag összesűrűsödésével, általában csoportosan keletkeznek, és ez a folyamat a Tejútrendszerben ma is tart. A molekulafelhő összehúzódása során a gravitációs instabilitás határát megadó Jeans-tömeg folyamatosan csökken. Amikor értéke megegyezik a molekulafelhők legdenser felhőmagjainak jellemző tömegével (néhány naptömeg), elkezdődik a magok gravitációs összehúzódása. Amikor a felhőmag közepe olyan sűrűvé válik, hogy már átlátszatlan a hősugárzás számára, a nyomás és a hőmérséklet nőni kezd. Az összehúzódás megáll, és belül kialakul egy, a környezetével nyomásegyensúlyban lévő, ám attól elhatárolódó objektum, a protocsillag. A protocsillagra lényegében a szabadesés sebességével

folyamatosan hull az anyag, és ebben a felhőmag egyre nagyobb sugarú része vesz részt. A csillag ezzel belép az elsődleges anyagbefogási fázisba, melynek fő jellemzője (egyben a protocsillag definíciója), hogy a kisugárzott energia szinte teljes egészében az anyagbefogással, az akkrécióval kapcsolatos gravitációs energiafelszabadulásból származik. A sugárzás a porszemcséken történő többszöri elnyelődés és kisugárzás után az infravörös tartományba konvertálódik, ahol akadálytalanul el tudja hagyni a csillag környezetét. A további fejlődés során, amennyiben a protocsillag tömege elegendően nagy, középpontjában elkezdődik a deutérium-, majd a hidrogénfúzió, és megindul a csillagból kifelé történő gázáramlás, a csillagszél is. A csillag körül pedig már egészen korán kialakul egy lapos por- és gázkorong, amelyből egyrészt tovább spirálozik be az anyag a csillag felszínére, másrészt amely a születő bolygórendszer bölcsője lesz.

Protoplanetáris por- és gázkorongok születőfélben lévő csillagok körül

A fiatal csillagok körüli por- és gázkorongok szerkezete megismerésének egyik legfontosabb eszköze a porszemcsék hősugárzásának analízise. A csillagtól távolodva a korong hőmérséklete csökken, és hősugárzását egyre hosszabb hullámhosszakon bocsátja ki. A korong legbelső része tehát a közeli-, míg a külső hideg területek a távoli-infravörösben adnak jelet. A mai infravörös-távcsövek viszonylag kis tükörméretük és az optikainál hosszabb hullámhosszak miatt általában nem bontják fel a korongokat, így azok integrált fényét mérjük. Azonban a közeli-, közép- és távoli-infravörös fluxusok erősségét összehasonlítva meghatározható a korong sugárirányú hőmérséklet-lefutása. Ez meghatározza, hogy hol kezdenek a gázmolekulák jég formájában kifagyni (az ún. jégvonal), és így megszabja, hol alakulhatnak ki gázbolygók. A fluxusok aránya utal arra is, hogy milyen távolságra mennyi anyag található a korongban. Manapság külön figyelmet kapnak azok a rendszerek, ahol a korongsugárzás közeli-infravörös komponense hiányzik: talán a korong belülről kifelé haladó „feltisztulását” látjuk? Nagyon izgalmasak azok a rendszerek is, amelyeknél a távoli-infravörös emisszió hiányzik: valamiféle külső hatás, például kettős rendszerekben a kísérő gravitációs ereje leborotválhatta a korong külsejét? Mindezek a hatások megszabják, hogy mekkora lesz a csillag végső tömege, és milyen bolygórendszer alakul ki körülötte.

Törmelékkorongok fősorozati csillagok körül

Az infravörös-csillagászat egyik legváratlanabb felfedezése, hogy idősebb, a Naphoz hasonlóan csillagéletük hosszú, viszonylag eseménytelen „felnettkorát” töltő csillagok körül is gyakran megfigyelhetők porkorongok. Ezekből az öreg korongokból a gázkomponens már eltűnt, a porszemcséket közvetlenül bombázzák a csillagfény fotonjai, amelyek a kisebb részecskéket kifűjják a rendszerből, a nagyobbakat pedig a Poynting–Robertson-hatás révén lefékezik, így azok rövid idő alatt bespiráloznak a csillagba. A por folyamatos utánpótlását a bolygókeletkezés során keletkezett planetezimálok, bolygócsírák, üstökösök ütközései biztosítják. Ezeket az égitesteket kis sugárzó felületük miatt közvetlenül nem figyelhetjük meg, azonban az általuk generált por egységnyi tömegre hatalmas felületet és így mérhető infravörös sugárzást biztosít. A törmelékkorongok szerkezete tehát információt nyújt arról, hol alakultak ki és maradtak fenn bolygócsíra-övezetek a rendszerben, és segít képet alkotni a bolygókeletkezés történetéről.

A törmelékkorongok nem a korai anyagbefogási korong maradványai, sokkal inkább egy harmadik generációs csillagkörüli struktúrának tekinthetők (a korai korongból összeálló planetezimálok tekinthetők a második generációnak). A Naprendszernek is ismerjük két porkorongját: a Mars-pályán belüli térrészt kitöltő bolygóközi porfelhőt, amely a kisbolygóöv ütközéseiből és a Napot megközelítő üstökösök felbomlásából táplálkozik, és a Neptunusz-pályán túl elhelyezkedő Kuiper-övet, ahol akár a Plútóhoz hasonló méretű égitestek is keringhetnek. A Kuiper-öv égitestjeiről még nagyon keveset tudunk, ez a helyzet azonban lényegesen javulni fog a Herschel-űrtávcső ez irányú megfigyelési programjai által, amelyekben az MTA Csillagászati Kutatóintézet is tevékenyen részt vesz.

A más csillagok körül eddig megfigyelt korongok többsége hideg, 100 K alatti hőmérsékletű, tehát a Kuiper-öv megfelelőinek tekinthetők. Van azonban néhány melegebb porgyűrű is, amelyek inkább a kisbolygóöv analógiái. Ilyen melegebb struktúrák megfigyelése fiatalabb csillagok körül nem meglepő, hiszen a bolygókeletkezés, a bolygócsírák kialakulása (és így az ütközéseik során fellépő portermelés) a rendszerben belülről kifelé halad. Vannak azonban olyan egészen idős csillagok is, amelyek esetében a portermelés valamiféle időszakos eseményre, például két nagyobb test katasztrofális ütközésére vezethető vissza. Az így keletkezett pornak azonban hamarosan el kell tűnnie a rendszerből, így a törmelékkorong csak időszakos jelenség, amelynek időfejlődése nagyon érdekes információkat adhat a porpopuláció utánpótlásáról. Egy efféle, sok ütközéssel járó időszak lehetett a Naprendszer életében a késői nagy bombázás korszaka mintegy 400 millió évvel a Nap kialakulását követően.

Infravörös-kutatások a Konkoly Infravörös és Űrcsillagászati Csoportban

Eruptív fiatal csillagok

Csoportunk egyik legfontosabb kutatási témája olyan fiatal csillagokkal kapcsolatos, amelyek időnként váratlanul kifényesednek (eruptív csillagok). A kitörés oka mai tudásunk szerint az, hogy a csillagkörüli korongból időszakosan a szokásosnál jóval nagyobb mennyiségű anyag hullik a csillagra. A jelenség fizikai magyarázata összefüggésben van a korong szerkezetével, illetve annak rövid időskálájú átrendeződésével, ezért az infravörös hullámhosszakon végzett megfigyelések, amelyek a korong porszemcséinek termikus emisszióját mérik, alapvető fontosságúak. Csoportunk vizsgálta az FU Orionis típusú eruptív csillagok évtizedes fényváltozásait infravörös hullámhosszakon (Ábrahám et al. 2004); feldolgozta az OO Serpentis 1995-2006-os kitörését (Kóspál et al. 2007); különböző műszerekkel követte és értelmezte a V1647 Orionis 2004-2006-os felfényesedését (Ábrahám et al. 2004, 2006; Acosta-Pulido et al. 2008; Mosoni et al., előkészületben), és az ESO Very Large Telescope NaCo műszerével feltérképezte a Par 21 korongján szóródó csillagfény polarizációs eloszlását (Kóspál et al. 2008).

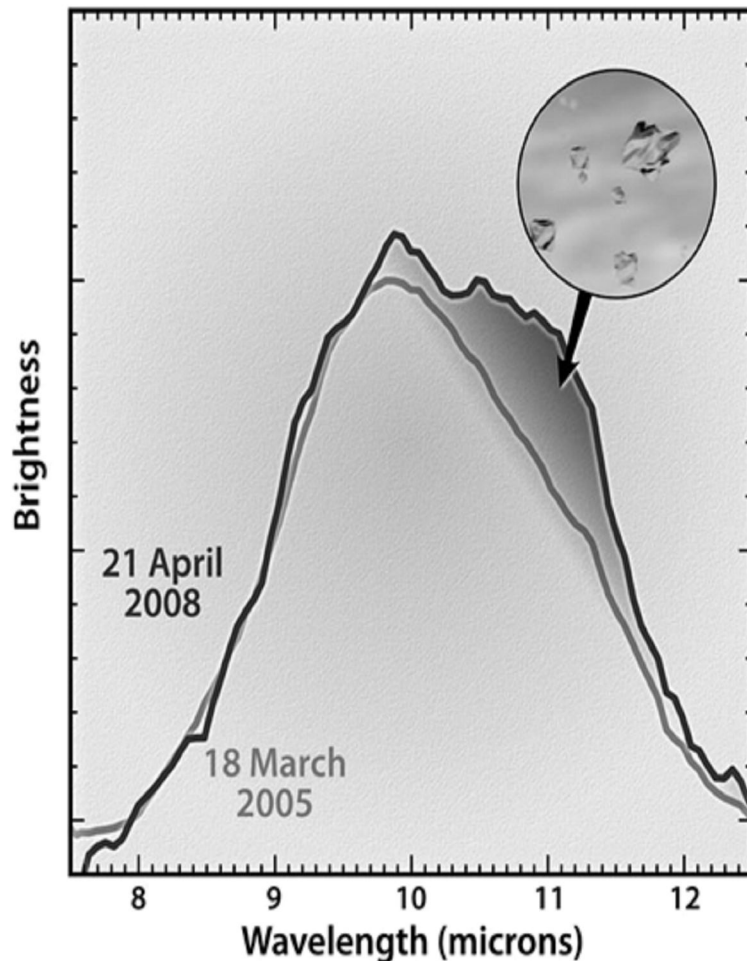
Időbeli változékonyság az infravörösben

Az, hogy a fiatal csillagok infravörös sugárzása időben változó, csak a legutóbbi években vált elfogadottá. A korongbeli porszemcsék hősugárzása két módon változhat: vagy a központi forrás fénye, tehát a szemcsék megvilágítása változik, vagy pedig a korong geometriája, amely bizonyos területek leárnyékolásához vezethet. Az MTA KTM Csillagászati Kutatóintézetében szisztematikusan megvizsgáltuk az infravörös fényváltozások lehetséges értelmezéseit, és módszerünket alkalmaztuk az SV Cephei fiatal csillagra. Megállapítottuk, hogy az ISO űrtávcső adatai szerint a korong belső peremét alkotó fal korongra merőleges kiterjedése néhány hónapos időskálán változik, valamilyen dinamikai folyamat következtében (Juhász et al. 2007). Hasonló fényváltozások megfigyelésére összeállítottunk egy olyan közép-infravörös színeképatlaszt, amelyben több mint 60 fiatal csillag ISO és Spitzer által észlelt színeképét hasonlítottuk össze, évtizedes fényváltozásokra vadászva. Az objektumok több mint felénél valóban találtunk változékonyságot, amelynek modellezése és értelmezése folyamatban van (Kóspál et al. 2010). Folyamatban van egy monitorozó programunk is a Spitzer űrtávcső műszereivel.

Törmelékkorongok F-színeképtípusú csillagok körül

Hosszú ideje nyitott kérdés, hogyan kerülhettek a Naprendszer hideg, külső peremvidékén kialakuló fagyos üstökösökbe azok az apró szilikátkristályok, amelyek csak rendkívül magas hőmérsékleten tudnak létrejönni. Az valószínűnek tűnt, hogy a kristályok amorf szilikátszemcsékként kezdték meg életüket ugyanabban a gáz- és porfelhőben, amelyből Naprendszerünk is kialakult, és később, a csillagkörüli korongban alakult át a belső szerkezetük. A folyamat részleteinek megfigyelésére a gyakran kifényesedő EX Lupi nevű fiatal csillag 2008. évi kitörése nyújtott egyedülálló lehetőséget. Az EX Lupi sok szempontból hasonlított arra, amilyen a Nap lehetett 4-5 milliárd évvel ezelőtt. A csillag

néhány évente rendszeresen kifényesedik, ami azzal magyarázható, hogy a csillagköri korong belső peremén fokozatosan felhalmozódó anyag rövid idő alatt rázúdul a csillagra. A kifényesedések mértéke változhat, az egészen nagy kitörések azonban, mint a 2008-as, csak körülbelül 50 évenként követik egymást. Kutatócsoportunk 2008 áprilisában felvételt készített az EX Lupiról a Spitzer űrtávcső infravörös színeképelemző berendezésével. Bár a csillag már halványodott januári, a kitörés csúcán mért fényességéhez képest, még mindig harmincszor fényesebb volt, mint nyugalomban.



Crystal Formation in the Disk of an Erupting Star
Spitzer Space Telescope • IRS

NASA / JPL-Caltech / P. Ábrahám (Konkoly Obs., Hungarian Academy of Sciences)

ssc2009-11a

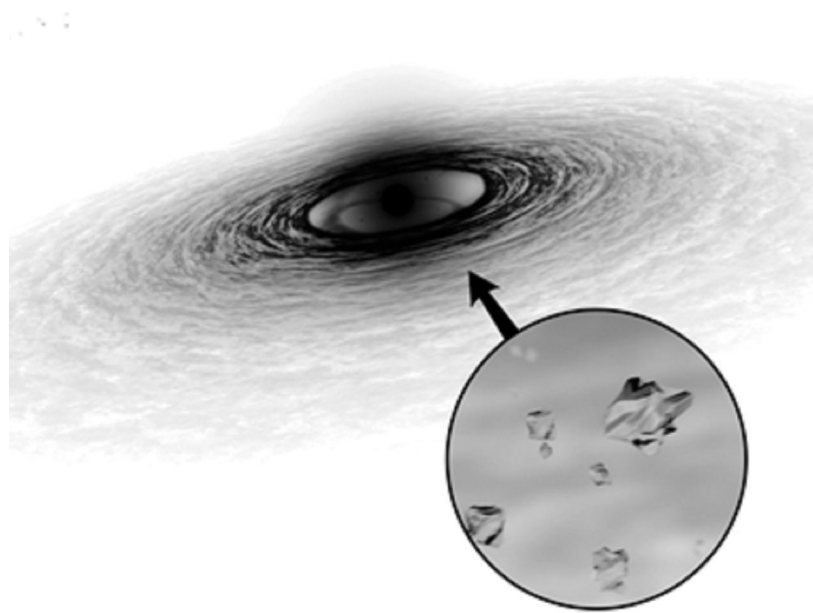
3. ábra. Kristálykeletkezés egy fiatal csillag körül. A két görbe a Spitzer színeképelemző berendezésével az EX Lupi fiatal csillag körüli por- és gázkorongról készített spektrumokat mutatja. A halványabb vonal egy 2005. március 18-i mérés, amikor a csillag még kitörés előtt, nyugalmi állapotban volt. A háromszögletű csúcs a csillagközi térben található amorf szilikátszemcsék jellegzetessége. A sötétebb vonal egy későbbi mérés 2008. április 21-éről, amikor a csillag már kitörésben volt. A vonal alatti szürke terület azt a színeképi változást mutatja, amely az újonnan keletkezett kristályos szilikátszemcséknek (l. kis kép) tulajdonítható. A két színeképet úgy skálázták össze, hogy kihangsúlyozza a forsteritkristályok színeképi jellegzetességeit. A második mérés idején az EX Lupi még mindig 30-szor fényesebb volt, mint nyugalomban (forrás: NASA/JPL-Caltech).

Kitörések tüzeiben keletkeztek az üstökösök kristályai?

Amikor az új felvételt összehasonlítottuk a csillagról 2005-ben készített nyugalmi Spitzer-méréssel, a változások szembeötlőek voltak. 2005-ben a csillagköri korong felszínét amorf szerkezetű szilikát

por alkotta. 2008-ban azonban a színek az amorf porszemcséken kívül szilikátkristályok jelenlétét is mutatta (3. ábra). A kristály valószínűleg forsterit, mely gyakran megtalálható üstökösökben és fiatal csillagok körüli korongokban is. A színek alapján a kristályok forróak voltak, ami azt bizonyítja, hogy magas hőmérsékleten alakultak ki (4. ábra).

Tudomásunk szerint ez volt az első eset, hogy sikerült közvetlenül megfigyelni a kristályképződés folyamatát egy kozmikus objektumban. A kristályok minden bizonnyal apró amorf porszemcsék felhevítésével jöttek létre a csillagkörüli korong belső részének felszínén, a kitörésből származó hő hatására. Ez a korábban ismertekhez képest egy teljesen új forrást nyitott fel arra, hogy hol és hogyan keletkezhetnek ezek az anyagok. Ezért eredményeink felvetik annak lehetőségét, hogy azok a kristályos szemcsék, amelyeket ma a naprendszerbeli üstökösök anyagában látunk, a fiatal Nap ismétlődő kitöréseinek tüzeiben keletkezettek. A kutatásról szóló tanulmányt a Nature folyóirat közölte 2009. május 14-i számában.



4. ábra. Fantáziarajz az EX Lupi fiatal csillagot körülvevő por- és gázkorongról. A kitörés során a korong belső pereméről a központi csillagra hulló anyag felszabaduló energiája felfűti a korongot. Ahol a hőmérséklet a korong felszínén 900 °C fölé emelkedik, az amorf szerkezetű szilikát porszemcsék átkristályosodnak (Ábrahám et al. 2009). (Forrás: NASA/JPL-Caltech)

Irodalom:

- Ábrahám, P., Kóspál, Á., Csizmadia, Sz., Kun, M., Moór, A., Prusti, T. 2004a, Long-term evolution of FU Orionis objects at infrared wavelengths, *Astron. Astrophys.*, 428, 89-97
- Ábrahám, P., Kóspál, Á., Csizmadia, Sz., Moór, A., Kun, M., Stringfellow, G. 2004b, The infrared properties of the new outburst star IRAS 05436-0007 in quiescent phase, *Astron. Astrophys.*, 419, L39-L42
- Ábrahám, P., Mosoni, L., Henning, Th., Kóspál, Á., Leinert, Ch., Quanz, S. P., Ratzka, Th. 2006, First AU-scale observations of V1647 Orionis with VLTI/MIDI, *Astron. Astrophys.*, 449, L13-L16
- Ábrahám, P., Juhász, A., Dullemond, C. P., Kóspál, Á., van Boekel, R., Bouwman, J., Henning, Th., Moór, A., Mosoni, L., Sicilia-Aguilar, A., Sipos, N. 2009, Episodic formation of cometary material in the outburst of a young Sun-like star, *Nature*, 459, 224-226
- Acosta-Pulido, J. A., Kun, M., Ábrahám, P., Kóspál, Á., Csizmadia, Sz., Kiss, L. L., Moór, A., Szabados, L., Benkő, J. M., Barrena Delgado, R., Charcos-Llorens, M., Eredics, M., Kiss, Z. T., Manchado, A., Rácz, M., Ramos Almeida, C., Székely, P., Vidal-Núñez, M. J. 2007, The 2004-2006 Outburst and Environment of V1647 Ori, *Astron. J.*, 133, 2020-2036
- Juhász, A., Prusti, T., Ábrahám, P., Dullemond, C. P. 2007, Long-term infrared variability of the UX

- Ori-type star SV Cep, *Monthly Notices of the RAS*, 374, 1242-1252
- Kóspál, Á., Ábrahám, P., Prusti, T., Acosta-Pulido, J., Hony, S., Moór, A., Siebenmorgen, R. 2006, The outburst of the eruptive young star OO Serpentis between 1995 and 2006, *Astron. Astrophys.*, 470, 211-219
- Kóspál, Á., Ábrahám, P., Apai, D., Ardila, D. R., Grady, C. A., Henning, Th., Juhász, A., Miller, D. W., Moór, A. 2008, High-resolution polarimetry of Parsamian 21: revealing the structure of an edge-on FU Ori disc, *Monthly Notices of the RAS*, 383, 1015-1028
- Kóspál, Á., Ábrahám, P., Kun, M., Moór, A., Henning, Th., Leinert, Ch., Acosta-Pulido, J. A. 2010, Mid-infrared spectral variability atlas of young stellar objects, *Astrophys. J.*, előkészületben
- Kun, M., Balázs, L. G., Tóth, I. 1987, Giant infrared bubble in Cepheus, *Astrophys. Space Sci.*, 134, 211-217
- Mosoni, L., Sipos, N., Moór, A., Ábrahám, P., Henning, Th., Juhász, A., Kóspál, Á., Kun, M., Leinert, Ch., Ratzka, Th., Schegerer, A., Wolf, S. 2010, Dynamics during outburst - Interferometric observations of the young eruptive star V1647Ori, *Astron. Astrophys.*, előkészületben